

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 19920111152787

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

光学元件磨抛加工亚表面损伤
分析与检测技术研究

Research on Subsurface Damage Analysis and Detection
Technology of Optical Element after Grinding and Polishing

吴 沿 鹏

指导教师姓名: 郭 隐 彪 教 授

专 业 名 称: 精密仪器及机械

论文提交日期: 2014 年 月

论文答辩时间: 2014 年 月

学位授予日期: 2014 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2014 年 05 月

光学元件磨抛加工亚表面损伤分析与检测技术研究

吴沿鹏

指导教师

郭隐彪
教授

厦门大学

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为(国家自然科学基金项目 510×××43)课题(组)的研究成果,获得(国家自然科学基金项目 510×××43)课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

随着光学科学领域的迅速发展,光学系统越来越精密,对光学元件的质量要求也在逐渐严格,不仅仅是要求其具有很好的表面光滑度,还要求不能存在亚表面损伤。在磨抛加工过程当中,光学元件将不可避免地会产生亚表面损伤,从而直接降低整个光学系统的成像质量、抗激光损伤阈值和持久稳定性等重要指标。因此,对光学元件磨抛光加工亚表面损伤的有效检测十分有利于确定后续步骤中的材料去除量以达到低亚表面损伤的目的。本文分析了光学元件磨抛加工亚表面损伤的产生机理,采用 HF 恒定化学蚀刻速率法和 HF 分阶蚀刻观测法对 K9 玻璃磨抛加工产生的亚表面损伤深度进行了测量,并结合光学材料亚表面损伤深度预测模型探讨了光学元件加工亚表面损伤的影响因素。主要研究内容包括:

1. 综合分析了光学材料的机械特性和磨抛加工亚表面损伤的产生机理,为测量磨抛加工亚表面损伤深度提供了理论基础。
2. 基于 HF 恒定化学蚀刻速率,结合光学显微镜观测建立了一种 HF 分阶蚀刻观测法,并应用到光学元件磨削加工亚表面损伤的测量中。
3. 比较金相显微镜、扫面电子显微镜、原子力显微镜的实验结果,改进 HF 分阶蚀刻观测法对光学元件抛光加工产生的亚表面损伤进行了有效的测量。
4. 实验讨论加工参数对光学元件磨削加工亚表面损伤的影响,提出了一种可以有效降低亚表面损伤的加工方法。

关键词: 光学元件; 亚表面损伤; 磨削; 抛光; 化学蚀刻

Abstract

With the rapid development in the field of optical technology, the quality of the optical elements requires higher precision. Not only requires high surface quality, but also requires no subsurface damage. The subsurface damages of optical elements that produced in grinding and polishing processes will directly influence the imaging quality of optical systems, laser-induced damage threshold of optical elements, secular stability. Thus effective measurement of the subsurface damages of optical elements that produced in grinding and polishing processes is the precondition in determining the removal amount of material in subsequent processes and improving the subsurface quality. In this paper, production mechanism of subsurface damages grinding and polishing processes was summarized. On the basis of the production mechanism, subsurface damage depth of ground and polished K9 glass was measured by HF constant etch rate method and HF phased etch observation method. Furthermore, the factors that affecting subsurface damages of ground the optical elements are explored by experiments combined the prediction model of optical materials subsurface damage depth. The main research contents are as follows:

1. The mechanical properties of optical materials and the production mechanism of subsurface damage in grinding and polishing processes are summarized, which provide theoretical basis for the subsurface damage measurement.
2. Based on the Constancy of HF chemical etch rate method, a HF phased etch observation method is developed and applied to the subsurface damages measurement of ground optical elements.
3. Compared the experiment results of metallographic microscope, SEM and AFM. Improved the HF phased etch observation method to measure the subsurface damages of polished optical elements effectively.
4. Discussed the impact of parameters on the optical elements grinding subsurface damages. Proposed a method which could reduce the subsurface damages.

Key words: Optical Elements; Subsurface Damage; Grind; Polish; Chemical Etch

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题研究背景	1
1.2 国内外研究现状	5
1.2.1 破坏性检测技术.....	6
1.2.2 非破坏性检测技术.....	9
1.3 课题主要研究内容	11
第二章 光学元件磨抛加工亚表面损伤的理论基础	13
2.1 光学元件的材料特性分析	13
2.2 光学元件磨抛加工过程分析	14
2.2.1 光学元件磨削加工过程分析.....	14
2.2.2 光学元件抛光加工过程分析.....	16
2.3 光学元件磨削加工亚表面损伤产生机理	20
2.3.1 裂纹产生机理.....	20
2.3.2 残余应力产生机理.....	21
2.4 光学元件抛光加工亚表面损伤产生机理	26
2.5 本章小结	27
第三章 磨削加工亚表面损伤分析与检测	28
3.1 HF 恒定化学蚀刻速率法原理.....	28
3.1.1 HF 恒定化学蚀刻速率法的化学基础	28
3.1.2 HF 恒定化学蚀刻速率法的物理基础	28
3.2 HF 分阶蚀刻观测法原理.....	29
3.3 HF 分阶蚀刻观测法测磨削加工亚表面损伤的实验研究.....	30
3.3.1 试件制备.....	31
3.3.2 HF 分阶蚀刻	32
3.3.3 亚表面损伤形貌观测及深度测量.....	33
3.4 化学蚀刻速率法与分阶蚀刻观测法对比实验研究	34
3.5 本章小结	37

第四章 抛光加工亚表面损伤分析与检测	38
4.1 HF 恒定化学蚀刻速率法测抛光加工亚表面损伤.....	38
4.1.1 试件制备.....	38
4.1.2 HF 恒定化学蚀刻速率法实验	39
4.2 HF 分阶蚀刻观测法测抛光加工亚表面损伤.....	40
4.2.1 试件制备.....	40
4.2.2 HF 分阶蚀刻结合金相显微镜观测法	41
4.2.3 HF 分阶蚀刻结合扫描电子显微镜观测法	43
4.2.4 HF 分阶蚀刻结合原子力显微镜观测法	45
4.3 本章小结	47
第五章 光学元件磨削加工亚表面损伤影响因素探究.....	48
5.1 光学材料亚表面损伤深度预测模型	48
5.2 亚表面损伤影响因素实验探究	50
5.2.1 试件磨削加工参数.....	50
5.2.2 分阶蚀刻实验.....	50
5.2.3 实验步骤.....	51
5.3 数据分析	53
5.3.1 实验结果及理论计算值.....	53
5.3.2 数据对比.....	54
5.3.2 结果分析.....	55
5.4 本章小结	57
第六章 总结与展望	58
6.1 总结	58
6.2 展望	59
参 考 文 献.....	61
致 谢.....	66
硕士期间科研成果	68

Table of Contents

Chapter1 Introduction.....	1
1.1 Background of Topic.....	1
1.2 Research Status at Home and Abroad	5
1.2.1 Destructive testing techniques	6
1.2.2 Non-destructive testing techniques	9
1.3 Main Research Areas	11
Chapter2 Basis Theory of Optical Elements' Subsurface Damage after Grinding and Polishing	13
2.1 Analysis of the Material Properties on Optical Elements	13
2.2 Analysis of Grinding and Polishing Process on Optical Elements ..	14
2.2.1 Analysis of Grinding Process on Optical Elements.....	14
2.2.2 Analysis of Polishing Process on Optical Elements	16
2.3 Mechanism of Subsurface Damage on Ground Optic Elements	20
2.3.1 Mechanism of Crack	20
2.3.2 Mechanism of Residual Stress	21
2.4 Mechanism of Subsurface Damage on Polished Optic Elements	26
2.5 Conclusions.....	27
Chapter3 Subsurface Damage Analysis and Detection of Optical Elements after Grinding	28
3.1 Principle of the HF Chemical Etch Rate Method	28
3.1.1 Chemical Basis of the HF Chemical Etch Rate Method.....	28
3.1.2 Physical Basis of the HF Chemical Etch Rate Method.....	28
3.2 Principle of the HF Phased Etch Observation Method	29
3.3 Subsurface Damage Experimental Study of Ground Optical Elements on HF Phased Etch Observation Method	30
3.3.1 Preparation of Specimens	31

3.3.2 HF Phased Etch.....	32
3.3.3 Observation and Depth Measurements of Subsurface Damage..	33
3.4 Experimental Study to Compare the Chemical Etch Rate Method and HF Phased Etch Observation Method	34
3.5 Conclusions.....	37
Chapter4 Subsurface Damage Analysis and Detection of Optical Elements after Polishing.....	38
4.1 Subsurface Damage Measurements of Ground Optical Elements on HF Chemical Etch Rate Method.....	38
4.1.1 Preparation of Specimens	38
4.1.2 Experiment of HF Chemical Etch Rate Method	39
4.2 Subsurface Damage Measurements of Ground Optical Elements on HF Phased Etch Observation Method	40
4.2.1 Preparation of Specimens	40
4.2.2 HF Phased Etch Observation Method with metallographic microscope	41
4.2.3 HF Phased Etch Observation Method with SEM	43
4.2.4 HF Phased Etch Observation Method with AFM	45
4.3 Conclusions.....	47
Chapter5 Explore the Impact of Parameters on The Optical Elements Grinding Subsurface Damage.....	48
5.1 Depth Prediction Model of Subsurface Damage	48
5.2 Experimental Exploration of Subsurface Damage Factors	50
5.2.1 Grinding Parameters of Specimens.....	50
5.2.2 Experiment of Phased Etch.....	50
5.2.3 Experimental Procedure.....	51
5.3 Data Analysis.....	53
5.3.1 Experimental Results and Theoretical Calculations	53

5.3.2 Data Comparison	54
5.3.2 Result Analysis.....	55
5.4 Conclusions.....	57
Chapter6 Summarize and Prospect	58
6.1 Summarize	58
6.2 Prospect.....	59
Reference.....	61
Acknowledgement	66
Achievements.....	68

第一章 绪论

1.1 课题研究背景

光学科学领域在当代科学中对人类发展起着至关重要的关键作用,它有着促进其他相关领域发展的巨大潜力,是个名副其实的“助推器”,其价值是难以估计的。随着光学科学的迅速进步,光学材料也得到了广泛应用,成为国防军工,工农业,科学技术现代化和人们日常精神文化生活等各个方面中一种极其重要的加工原材料。光学材料在现代社会中的应用日趋成熟,同时也对光学元件的表面质量提出了一个更高的要求,所以就必须尽可能地优化光学元件的加工过程。磨削和抛光是光学元件加工过程中的两个重要阶段,其中磨削属于粗加工,磨削完毕后的工件面形基本成型而且材料去除效率较高,是因为脆性碎裂为磨削阶段中工件材料去除的主要因素^[1]。而抛光则属于精加工,材料去除效率较低,因为抛光阶段工件材料的去除主要是粘着和碰撞去除^[2]。不过,这两个阶段都会不可避免地引入杂质、划痕、裂纹和残余应力等亚表面损伤^[3]。这些亚表面损伤将会导致光学元件的材料强度下降、改变折射系数^[4]等,从而降低光学元件的使用寿命、稳定性等重要性能指标,对由光学元件构成的光学系统的整体性能造成非常大的不利影响^{[5][6]}。

近年来世界各国对激光核聚变的需求日益增长,美、日、法、中等国家已先后建立了多套大型激光装置。其中以美国 LLNL 实验室建造的国家点火装置(NIF)最为先进。NIF(如图 1.1 所示)长 215 米,宽 120 米,共有 192 路光束,使用了 7360 块直径范围为 0.5~1m 的大型光学元件是,是目前世界上最大的光学系统^[7]。在开发 NIF 光学系统时科学家面临的众多科学技术难题挑战中,最困难的挑战是如何降低或者消除激光所诱发的损伤。这是由于光学元件中存在的损伤在激光的照射下会产生光场强化,这样光学元件的损伤点尺寸将会呈指数增长,进而降低甚至于丧失光学性能^[8];在光学材料内部,亚表面损伤会引起集中的电磁场分布,极易造成电子崩离、自发聚焦,降低材料的抗损伤能力^[9];此外,在激光发射时一部分激光能量会被亚表面损伤吸收走,局部产生高温,导致极强

的热应力，最终压碎材料^[10]。

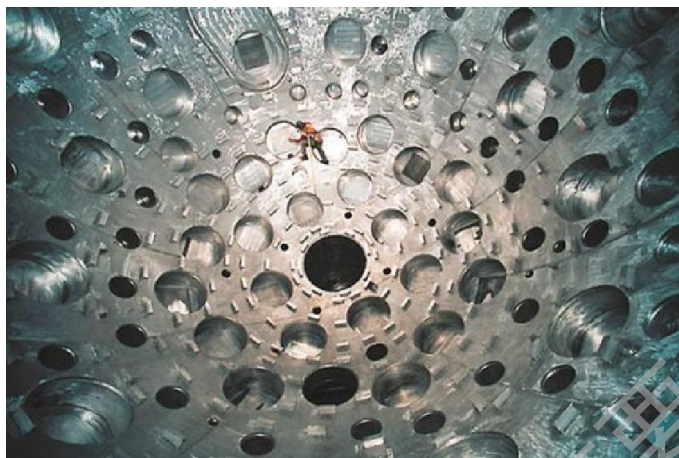


图 1.1 美国国家点火装置 NIF

而在大型空间望远镜系统中，关于镜面屈服度与平面度，亚表面损伤的水平及数目起着关键的作用(如图 1.2 所示)；光学元件亚表面损伤中存在的严重结构损伤将会在激光发射的过程中产生无法估计的机械附加应力，而直接使光学系统失效；此外，当光学元件处于太空环境中时，由于外界温差变化极大，即便能够满足一些性能指标，但亚表面裂纹仍会逐渐扩大，造成镜面扭曲，致使其很难达到严格的面形度及平面度的要求^[11]。



图 1.2 “哈勃”空间望远镜

高分辨率对地侦察卫星和地基天文望远镜(如图 1.3 所示)中也需要使用到大

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”. Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库